

УДК 669.14-176; 669.017.3

**Л. О. Ведерникова<sup>\*</sup>, Е. А. Макарова, С. В. Данилов, В. И. Пастухов**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

<sup>\*</sup>*lory\_26@mail.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *М. Л. Лобанов*

## ТЕКСТУРНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ТРУБ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

Методом ориентационной микроскопии (EBSD) исследованы особенности формирования структурно-текстурного состояния в бесшовных трубах из высокохромистой стали мартенситного класса после горячей деформации и последующей закалки с высоким отпуском. Показано, что мартенситная структура, сформированная как после горячей деформации, так и после закалки с отпуском характеризуется наличием выраженной ограниченной кристаллографической текстуры, предопределенной деформационной текстурой аустенита.

*Ключевые слова:* нержавеющие трубные стали, горячая прокатка, закалка, отпуск, мартенсит, текстура, ориентационная микроскопия.

***L. O. Vedernikova, E. A. Makarova, S. V. Danilov, V. I. Pastukhov***

## TEXTURAL HEREDITY IN THE PRODUCTION PROCESS OF SEAMLESS TUBES FROM STAINLESS MARTENSITIC STEEL

Formation features of structural-texture state were studied with orientational microscopy method (EBSD). These formation features were in seamless pipes from high-chromium martensitic class steels after hot deformation and subsequent hardening with high tempering. It is shown, that the formed martensitic structure both after hot deformation and after quenching with tempering is characterized by the presence of a pronounced limited crystallographic texture predetermined with deformation texture of the austenite.

*Keywords:* stainless steel tubes, hot deformation, quenching, tempering, martensite, texture, EBSD.

Освоение нефте- и газовых месторождений в прибрежных зонах и открытом море, где возможно одновременное воздействие на эксплуатируемые материалы морской воды и углекислого газа предполагает использование труб из высокохромистых коррозионно-стойких сталей типа «13Cr» и «супер-хром» [1–3]. Высокое легирование данного класса материалов обеспечивает в изделии при деформации и термических обработках дисперсную, преимущественно мартенситную, структуру,

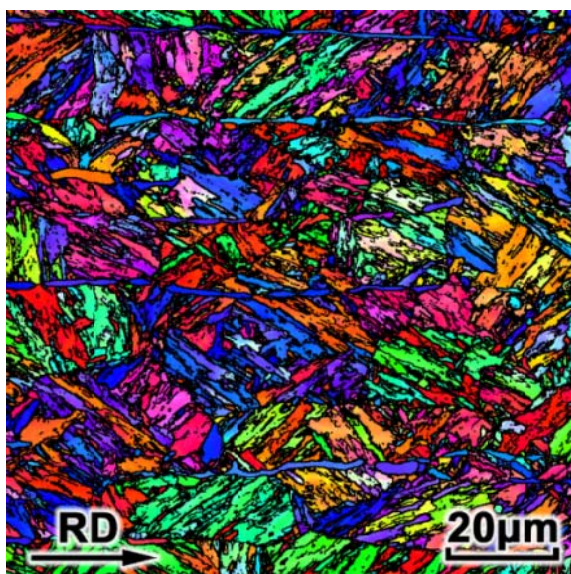
дополнительно упрочненную карбидными фазами, с уникальным комплексом химических и механических свойств [4–7].

Целью данной работы являлось исследование особенностей формирования структуры бесшовных труб из высокохромистой стали мартенситного класса на промышленных стадиях изготовления изделия: горячей деформации и закалки с высоким отпуском для дальнейшей оптимизации технологии производства изделий.

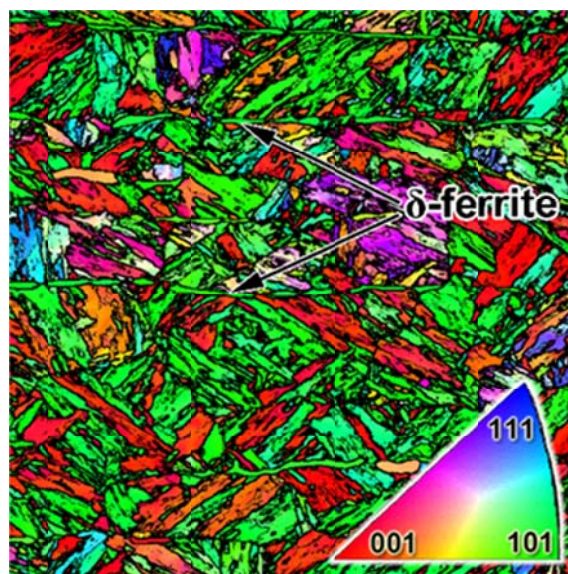
В качестве объекта исследования использовали образцы размером  $130 \times 70 \times 6$  мм, отобранные от бесшовных горячедеформированных труб, изготовленных из низкоуглеродистой стали марки 10X13H3МФБ. После горячей прокатки (ГП) образцы подвергали закалке при температуре  $960 \pm 5$  °С, с выдержкой 15 минут и последующим охлаждением на воздухе, затем отпуску при температуре  $620 \pm 5$  °С в течение 45 минут. Металлографические шлифы приготавливались с плоскости RD–ND (где RD – направление прокатки при ГП, ND – направление нормали к образующей трубы). Электронно-микроскопические исследования текстурно-структурного состояния проводились на растровом микроскопе ZEISS CrossBeam AURIGA при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для определения ориентировки отдельных зерен и анализа локальной текстуры использовалась приставка EBSD HKL Inca с системой анализа Oxford Instruments.

Микроструктура образцов как после ГП, так и после ТО (рис.) преимущественно состояла из мартенситных пакетов. Размер пакетов для всех случаев сопоставим с величиной деформированных (вытянутых параллельно RD) при ГП зерен аустенита. По границам исходных деформированных  $\gamma$ -зерен наблюдались вытянутые зерна  $\alpha$ -фазы ( $\delta$ -феррит). Дисперсность пластин в мартенситных пакетах после ТО заметно увеличивалась, вытянутые зерна  $\alpha$ -фазы не фиксировались (рис. в, г).

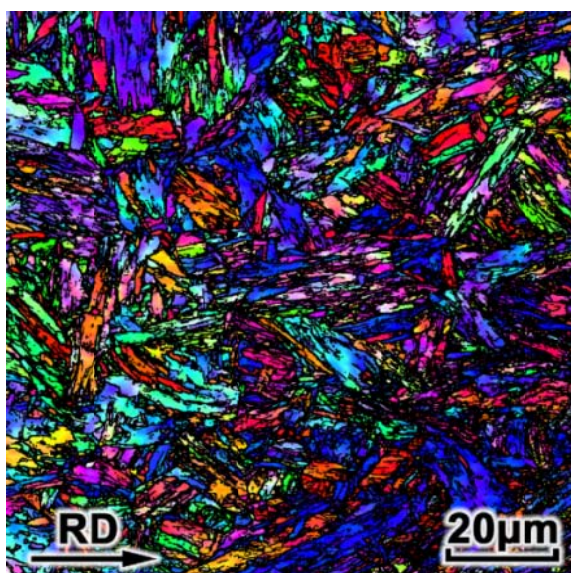
После всех обработок полученные мартенситные структуры характеризовались наличием выраженной кристаллографической текстуры, состоящей из рассеянных ориентировок:  $\{001\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{013\} \langle 100 \rangle$ ,  $\{011\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{11k\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{110\} \langle 110 \rangle$ . В локальных областях интенсивность отдельных ориентировок могла достаточно сильно варьироваться. Однако в целом спектр мартенситных ориентировок оставался одним и тем же. Согласно [8] данный спектр соответствовал ориентировкам  $\alpha$ -фазы, полученной в результате сдвигового фазового превращения из стабильных ориентировок деформированного аустенита [9, 10] в соответствии с ориентационными соотношениями (ОС) промежуточными между ОС Курдюмова–Закса и Нишиямы–Вассермана. Распределения межкристаллитных и специальных границ (рис. д, е) в точности соответствуют спектрам специальных ориентаций, возникающих при сдвиговом  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении согласно [8].



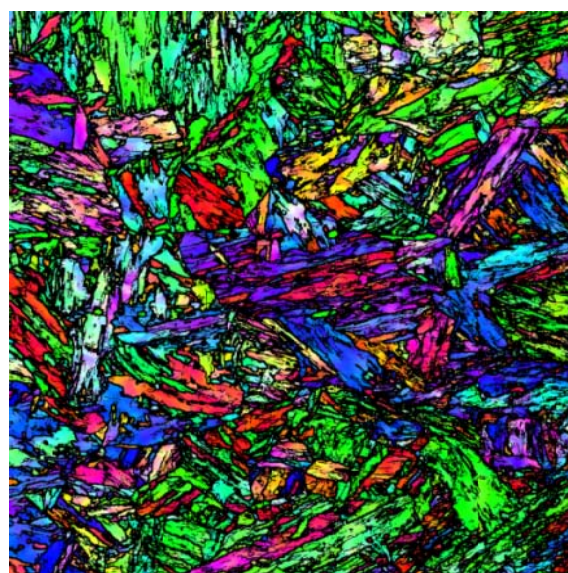
*a*



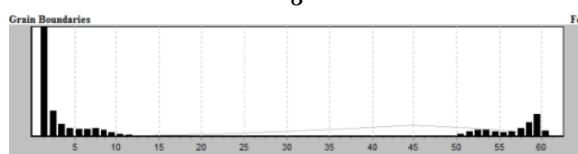
*б*



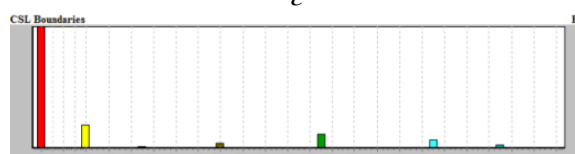
*в*



*г*



*д*



*е*

Рис. Микроструктура и текстура стали 10X13H3MF после горячей прокатки (*а, б*) и последующей закалки с отпуском (*в, г*) в виде ориентационных карт (EBSD):  
*а, в* – ориентационные карты в расцветке с направления нормального к образующей трубы (ND);  
*б, г* – ориентационные карты в расцветке с направления прокатки (RD);  
*д* – распределение межкристаллитных границ по углам разориентации;  
*е* – распределение специальных границ

Применяемая методика ориентационной микроскопии (EBSD) позволила выделить в образцах после ГП  $\delta$ -феррит (рис. *а, б*) и проанализировать его текстуру. Ориентировки феррита  $\{001\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{11k\} \langle 110 \rangle$ , сформировавшегося при ГП, являются стабильными

деформационными ориентировками ОЦК-решетки [9, 11]. Следует отметить, что с учетом кристаллогеометрических характеристик  $\delta$ -феррита (ориентировки, форма и размеры зерен), он является своего рода «макродефектом», нуждающимся в устранении за счет ТО. По кристаллографическим плоскостям  $\{001\}$  его вытянутых зерен беспрепятственно будет происходить развитие трещин при разрушении изделия [10, 12].

Важно подчеркнуть, что ориентировки мартенсита после ГП и после ТО совпадают. Последнее предполагает реализацию в материале текстурной наследственности – основные компоненты текстуры аустенита трансформируются в дискретный набор ориентировок мартенсита при охлаждении после ГП. При последующем нагреве ориентировки мартенсита трансформируются в текстуру аустенита, совпадающую с текстурой  $\gamma$ -фазы при ГП. Закалка восстановленного аустенита приводит вновь к формированию мартенсита с присущим ему набором компонент текстуры. Подобный механизм эволюции текстуры при фазовых превращениях [13] предполагает наличие в структуре материала после ГП неких факторов, ответственных за наследственность. Согласно [10, 14] подобным фактором могут служить сформированные при горячей деформации специальные границы  $\Sigma 3$  и  $\Sigma 11$  между деформированными аустенитными зернами.

*Работа выполнена с использованием оборудования лаборатории «Структурных методов анализа и свойств материалов и наноматериалов» ЦКП УрФУ. Авторы благодарят ПАО «ТМК» за поддержку и содействие в организации исследования.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Development of high chromium stainless line pipe / H. Asahi [et al.] // Nippon Steel Technical Report. 1997. P. 53 – 58.
2. Gooch T. G. Heat treatment of welded 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steels for sour service / T. G. Gooch // Welding Journal. 1995. V. 74. P. 213s – 223s.
3. Rhodes P. R. Environment-assisted cracking of corrosion-resistant alloys in oil and gas production environments: A review / P. R. Rhodes // Corrosion. 2001. V. 57. P. 923 – 966.
4. Lo K. H. Recent developments in stainless steels / K. H. Lo, C. H. Shek, J. K. L. Lai // Materials Science and Engineering R: Reports. 2009. V. 65. P. 39 – 104.
5. Механическое поведение и хрупко-вязкий переход в высокохромистой мартенситной стали / М. В. Однобокова [и др.] // ФММ. 2016. Т. 117, № 4. С. 404 – 413.



6. Song Y. Y. Microstructural evolution and low temperature impact toughness of a Fe-13%Cr-4%Ni-Mo martensitic stainless steel / Y. Y. Song [et al.] // Materials Science and Engineering A. 2010. V. 527. P. 614 – 618.
7. Akhmed'yanov A. M. Hot deformation of martensitic and supermartensitic stainless steels / A. M. Akhmed'yanov, S. V. Rushchits, M. A. Smirnov // International Conference on Industrial Engineering-2016, Materials Science Forum. 2016. V. 870. P. 259 – 264.
8. Лобанов М. Л. Исследование специальных разориентаций в речном мартенсите низкоуглеродистой стали методом ориентационной микроскопии / М. Л. Лобанов [и др.] // ФММ. 2016. Т. 117, № 3. С. 266 – 271.
9. Hölscher M. Relationship Between Rolling Textures and Shear Textures in F.C.C. And B.C.C. Metals / M. Hölscher, D. Raabe, K. Lücke // Acta metall. 1994. V. 42, № 3. P. 879 – 886.
10. Влияние кристаллографической текстуры бейнита на разрушение листов трубных сталей, полученных контролируемой термомеханической обработкой / И. Ю. Пышминцев [и др.] // Металлург. 2016. № 4. С. 57 – 63.
11. Русаков Г. М. Модель переориентации монокристаллов с ОЦК-решеткой при холодной прокатке / Русаков Г. М. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2010. № 3. С. 34–40.
12. Данилов С. В. Причина формирования расщеплений при разрушении трубных сталей, изготовленных методом ТМСП / С. В. Данилов, Е. Р. Струина, М. Д. Бородина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60, № 3. С. 247 – 249.
13. Pyshmintsev I. U. Evolution of the texture of low-carbon microalloyed pipe steel in the seamless pipe manufacturing process / I. U. Pyshmintsev [et al.] // 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2016. AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1785. P. 040053.
14. Структурная и текстурная наследственность при  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -превращениях в малоуглеродистой низколегированной трубной стали / М. Л. Лобанов [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2016. Т. 16, № 2. С. 46 – 54.